Aus dem Universitätinstitut für Röntgenologie und Radiologie
der Charité zu Berlin
(Direktor: Prof. Dr. K. Frik).

Phantom-Messungen bei Schrägrotationsbestrahlung

Inaugural-Dissertation

zur
Erlangung des Medizinischen Doktorgrades
an der
Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

vorgelegt von

Günter Lengeling
aus Berlin

Tag der Promotion: 23. Dezember 1942

BUCHDRUCKEREI u. VERLAG RUDOLPH PFAU, BERLIN NW 7

M 213

Gedruckt mit Genehmigung
der
Medizinischen Fakultät der Universität Berlin

Dekan: Prof. Dr. Rostock
Referent: Prof. Dr. Frik

Einleitung.

In der Entwicklung der Strahlenheilkunde wurde bereits frühzeitig die Wichtigkeit der Dosis für die radikale Zerstörung eines Tumors erkannt. Fast alle Bestrebungen im Aufbau der Bestrahlungstechnik waren und sind noch darauf gerichtet, die höchstmögliche Dosis an die Geschwulst zu bringen. Gerade für die Tiefentherapie wurde es damit zu einem Problem, an die tief im Körperinnern lokalisierten Tumoren die erforderliche Strahlenenergie zu bringen, ohne die gesunde Umgebung, insbesondere das vorgelagerte Gewebe in unerwünschter Weise zu schädigen. Zu diesem Ziel führen drei grundlegend voneinander verschiedene Methoden: die Erhöhung der Spannung, der Fokus-Haut-Abstand und die Anwendung mehrerer Bestrahlungsfelder, als sogenannte Kreuzfeuermethode. In Erweiterung der letzteren folgt die Pendelbestrahlung und die Rotationsbestrahlung.

Die Rotations- und Pendelbestrahlung kann ihrem Prinzip nach als ein Grenzfall der Kreuzfeuertechnik aufgefaßt werden, bei dem der Querschnitt eines möglichst eng ausgeblendeten Strahlenbündels als wanderndes Bestrahlungsfeld auf eine Vielzahl von Einfallsfeldern verteilt wird. Der Schöpfer dieser Methode war Kohl. Aus seiner Patentschrift, vom Jahre 1906, lesen wir in Kürze folgendes heraus: Eine Röntgenröhre ist an einem Drehgestell befestigt, das durch einen Motor in Rotation versetzt wird. Die Röhre ist außerdem an dem Gestell auf einer Führungsbahn verschieblich. In den Schnittpunkt der Drehachse mit dem ausgeblendeten Strahlenbündel wird die zu bestrahlende Stelle gebracht, die daher der Strahlenwirkung dauernd ausgesetzt ist, während auf der Haut stets andere Stellen getroffen werden. Pohl gab 1913 mehrere Abwandlungen dieses Prinzips an. Bei seinen Konstruktionen kreiste die Röntgenröhre senkrecht zur Längsachse des Patienten um 360°, oder vollführte nur eine Pendelbewegung. Statt der Bewegung der Röhre war bei einer anderen Ausführungsform eine Drehung oder Pendelbewegung des Patienten vorgesehen. Durch den weiteren Ausbau der Hochvolttherapie geriet diese Methode vorübergehend in den Hintergrund. 1929 nahm Archangelsky die Rotationsbestrahlung mit pendeln-

der Röhre wieder auf. Von Kohler wurde hierfür eine technisch ausgezeichnete Apparatur entwickelt. 1937 berichtete Flax in der Radiology (Am. Bd. 28, 477) über Isodosenmessungen an rotierenden Röhren. Die Idee, Patienten rotieren zu lassen, die technisch bedeutend leichter durchzuführen ist, wurde von Mayer und Reiss, Dessauer und Gökmen wieder aufgegriffen. Dessauer, Lion und Gökmen veröffentlichten Berechnungen und Phantom-Messungen, Du Mesnil de Rochemont stellte von der physikalischen Seite her eingehende Berechnungen über die Dosisverteilung bei der Rotationsbestrahlung an. Die ersten therapeutischen Beobachtungen mit durchaus günstigem Erfolg machten Nakaidzumi, Dessauer mit ihren Mitarbeitern und Kohler.

Die weitere Entwicklung der Rotationsbestrahlung nahm ihren Weg über die Pohlsche Konstruktion, deren sich auch Mayer, Reiss und Dessauer bedienten. Weitere Verbesserungen erreichte man durch Vereinfachung der Apparaturen, bequeme und sichere Lagerung des Patienten und durch größtmögliche Genauigkeit beim Einstellen der zu bestrahlenden Stelle in den Schnittpunkt der Drehachse mit dem Strahlenbündel. Eine Erhöhung der Tiefendosis war dadurch möglich, daß man den Winkel zwischen Hauptstrahl und Drehachse $< 90°$ wählte. Das Strahlenbündel, welches vorher gleich einem radius vector eine Ebene durchlief, umschreibt nun durch die Winkeländerung einen Raum in Form eines Doppelkegels mit einander zugekehrten Spitzen, die im Krankheitsherd liegen. Hierdurch wird die ganze, den Körper durchdringende Strahlung noch mehr verteilt und damit das gesunde Gewebe noch mehr geschont. Im praktischen Teil meiner Arbeit habe ich mir die Aufgabe gestellt, durch Messungen die tatsächlichen Dosen für die einzelnen Punkte des durchstrahlten Raumes zu ermitteln und festzustellen, unter welchen Bedingungen, d. h. bei welcher Größe des Strahleneinfallswinkels, der günstigste Effekt erzielt wird.

Damit war man also auf die Idee der oben erwähnten Kohlschen Konstruktion zurückgekommen, nur daß man jetzt anstelle der Röntgenapparatur den Tisch, auf dem der Patient in horizontaler Lage ruht, in rotierende Bewegung versetzte. Auch hier wird der Hauptstrahl der von oben auf den Patienten gerichteten Röhre so eingestellt, daß er die Drehachse in einem Winkel zwischen 25° und 75° schneidet. Durch die Anwendung eines streng auf die Größe des Krankheitsherdes eingeblendeten Strahlenbündels erzielt man eine weitgehende Schonung des gesunden Gewebes. Der Vorteil der „Verdünnung" der die gesunde Umgebung durchsetzenden Strahlung durch die Rotation könnte ferner noch dadurch erhöht werden, daß man während der Bestrahlung den Einfallswinkel ständig ändert, so daß der Hauptstrahl auf der Haut zum Beispiel

eine Spirale beschriebe. Hierbei würden jedoch in bezug auf die Konstruktion erhebliche technische Schwierigkeiten auftreten, so daß wir uns in der Praxis zunächst mit der einfachen Rotation begnügen müssen.

Unter den erwähnten Bedingungen läßt sich mit der Rotationsbestrahlung eine räumliche Verteilung der Strahlendosis erreichen, welche die der Kreuzfeuertechnik bei weitem übertrifft und schon der Dosenverteilung bei der intratumoralen Radiumbestrahlung nahe kommt. Die Rotationsbestrahlung dieser Art wäre also die ideale Methode der Tiefentherapie, wenn auch die genaue Einstellung des Tumors jeweils erfüllbar wäre. Hierbei ist, außer einer exakt arbeitenden Einstellvorrichtung, die auch die Kontrolle während der Rotation ermöglichen muß, die genaue Kenntnis über die Lage und Ausdehnung des Tumors Voraussetzung. Ist diese nicht einwandfrei zu ermitteln, so ist es besser, unter Berücksichtigung der Vorteile der Kompression eine mehr gleichmäßige Bestrahlung von Tumor und gesundem Gewebe durchzuführen und den Erfolg von der höheren Strahlenempfindlichkeit des Tumorgewebes zu erwarten, als sich der Gefahr auszusetzen, das gesunde Gewebe mehr zu schädigen als die Geschwulst. Der Indikationsbereich der Rotationsbestrahlung wird durch die Schwierigkeiten dieser genauen Einstellung des Krankheitsherdes stark eingeschränkt. Gute Anwendungsmöglichkeiten haben wir jedoch in erster Linie bei den gut lokalisierbaren Lungen- und Oesophagustumoren, bei denen auch durch Kompression nicht viel erreicht wird und die operativ ebenfalls schwer erreichbar sind, sowie bei den Infiltrationen der Parametrien.

Versuchsanordnung.

Für die Durchführung der Messungen gelangte das Prinzip der Schrägrotationsbestrahlung zur Anwendung. Die in der Einleitung besprochene Kohlsche Konstruktion wurde nur insofern abgeändert, als, anstelle der Röntgenröhre, der Patient in rotierende Bewegung versetzt wurde. Der Grund für diese Abänderung war in erheblichen technischen Vorteilen und bedeutend besseren Konstruktionsmöglichkeiten zu suchen, die der Rotationstisch gegenüber der schwenkbaren Röhre bot. Schlechte Verträglichkeit dieser rotierenden Bewegung von Seiten des Patienten war bei einer Umlaufzeit von einer Minute nicht zu befürchten. Auch haben die seit etwa eineinhalb Jahren an dem hiesigen Universitätsinstitut nach dieser Methode in der Praxis durchgeführten Rotationsbestrahlungen in jeder Hinsicht gute Erfolge gezeigt.

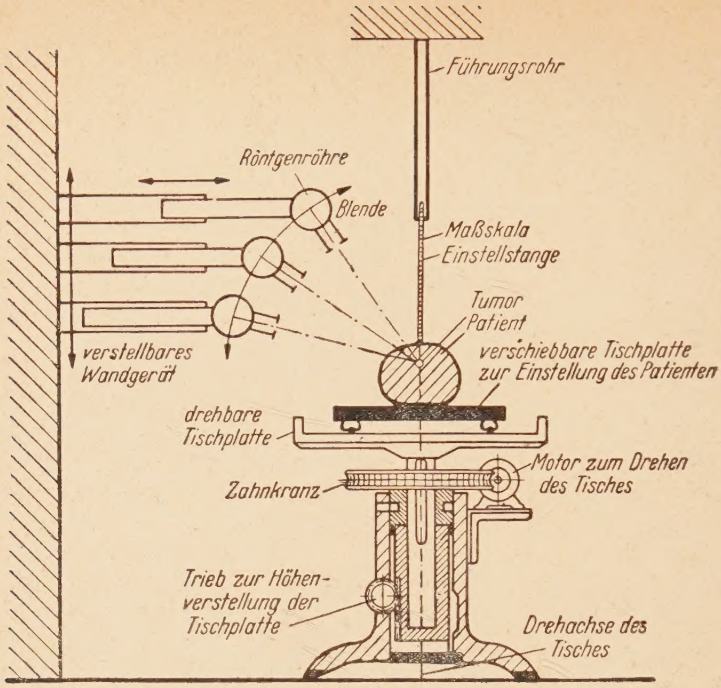


Abb. 1

Der in Abb. 1 gezeigte Aufriß stellt die Versuchsapparatur dar. Das Bestrahlungsgerät ist ein Serienfabrikat vom Typ: „Super T 200" des Röntgenwerkes C. H. F. Müller A.-G., Hamburg.

Der Rotationstisch ist eine Sonderanfertigung desselben Werks.

Das Wesentliche dieses Tisches ist aus der Zeichnung leicht ersichtlich: In einem Fußsockel ist, in der Lotrechten verstellbar, ein Drehgestell eingelassen, das vermittels einer Transmission oder Zahnradübersetzung an den daneben liegenden Elektromotor gekoppelt ist, durch den es in rotierende Bewegung versetzt werden kann. Auf dem Drehgestell ist, durch eine doppelte Laufschienenkonstruktion allseits in der Horizontalen verschieblich, die Tischplatte befestigt. Diese Verschieblichkeit innerhalb der horizontalen Ebene ist notwendig, um den zu bestrahlenden Tumor, je nach seiner Lokalisation, in die vertikale Verlängerung der Drehachse des Tisches bringen zu können.

Als Material für das Phantom wurde Paraffin gewählt, das, wie etwa Reis und Wasser, einen ähnlichen Absorptionskoeffizienten wie lebendes Gewebe besitzt. Die Form des Phantoms glich einem Thorax normaler Größe. In diesem Paraffinblock befanden

sich neun vertikale Bohrungen von 11 mm Ø und 12 cm Tiefe. Die Zentralbohrung sollte durch die angenommene Tumormitte laufen. Um sie herum befanden sich die anderen Bohrungen in Abständen vom Zentrum von 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 und 11 cm. Es war darauf zu achten, daß die Bohrungen untereinander möglichst gleiche Abstände hatten, um zu vermeiden, daß eine stellenweise Häufung der Luftsäulen die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigen könnte. Der Einwand: zur Vermeidung der Luftsäulen und damit besseren Homogenisierung des Materials beispielsweise ein Reisphantom zu benutzen, scheitert daran, daß eine genaue Einstellung der Tiefe und Abstände der Kondensatorkammern, vor allem aber eine dauernde Kontrolle während der Bestrahlung nur äußerst schwer durchführbar ist.

Zur Messung der Dosisleistung im Tubus fand das Hammerdosimeter Verwendung. Zur Messung der aufgenommenen Strahlenmenge im Phantom wurden Kugelkondensatoren von 10 mm Ø, der „Physikalisch-Technischen Werkstätten" aus Freiburg i. Br. benutzt. Zur Aufladung und Messung der Kondensatoren kam das Kondiometer, ebenfalls von den „P. T. W.", zur Anwendung. Vor Beginn der Messungen war es natürlich notwendig, Eichwerte der Kugelkondensatoren zum Hammerdosimeter aufzustellen. Zur weitgehenden Einblendung des Strahlenbündels wurde für unsere Zwecke ein Spezialtubus mit Doppelblende von 2×2, 3×3 und 4×5 cm Strahlenaustrittsöffnung angefertigt.

Für die präzise Einstellung des gedachten Tumors in den Schnittpunkt des Hauptstrahls mit der Drehachse des Tisches stand, wie aus Abb. 1 ersichtlich, ein Lot zur Verfügung, das die verlängerte Achse darstellte. Zur Ermittlung des geeigneten Fokus-Haut-Abstandes und zur Einstellung des gewünschten Bestrahlungswinkels wurde ein kombiniertes Abstand- und Winkelmeßgerät, nach Art des von S t r a n d q v i s t veröffentlichten, konstruiert. Dieses Gerät bestand aus einer normalen Tubusgrundplatte, mit der es in der gleichen Weise wie ein Bestrahlungstubus vor das Röhrenfenster gesetzt werden konnte. Auf der Grundplattenmitte war ein in der Länge verstellbarer Meßstab mit Zentimetereinteilung angebracht, der in der Hauptstrahlrichtung verlief. An diesem Meßstab befand sich, an einer Querleiste drehbar eingelagert, ein Sektor mit Winkelgradeinteilung. Dieser Sektor wurde nun durch zwei Zeigerlote in die Vertikalebene gebracht. So konnte man erstens den gewünschten Winkel ablesen und zweitens an dem, ebenfalls auf dem Sektor eingezeichneten, unter der Winkeleinteilung befindlichen Koordinatensystem den für die jeweilige Tumortiefe notwendigen Abstand: Drehachse—Einfallsfeldmitte auf der Oberfläche in Zentimetern ermitteln. Für eine Tumortiefe von 10 cm würde das beispielsweise heißen, daß bei einem Einfallswinkel von 45° der Abstand an der Oberfläche: Drehachse—Ein-

fallsfeldmitte, ebenfalls 10 cm beträgt. Diese 10 cm sind gleichzeitig der Radius des Kreises, den der Hauptstrahl auf der Körper- bzw. Phantomoberfläche während der Rotationsbestrahlung beschreibt. Bei Winkeln unter 45°, von der Drehachse gemessen, verkleinert sich der Radius entsprechend, während er sich bei denen über 45° vergrößern muß. Dieses gilt natürlich nur bei Bestrahlungen an größeren Körperräumen mit mäßig gewölbter Oberfläche. Wir sehen also, daß die Schrägrotationsmethode bei extrem spitzen Winkeln auf die Wirkungsweise der Einfeldtherapie zurückkommt. Bestrahlungswinkel über 60° kommen am Rotationstisch rein technisch, wegen der horizontalen Lage des Patienten nicht in Betracht. Auf diesem Wege würden wir wieder zu den P o h l'schen Methoden gelangen, also zur Rotationsbestrahlung bei sitzenden oder liegenden Patienten in einer Ebene.

M e s s u n g e n a m P h a n t o m.

Alle Messungen wurden unter folgenden, gleichbleibenden Bestrahlungsbedingungen durchgeführt:

180 kV	40 cm FHA
8 mA	4×5 cm Tubus
0,5 Cu Filter	60 sec Umlaufszeit.

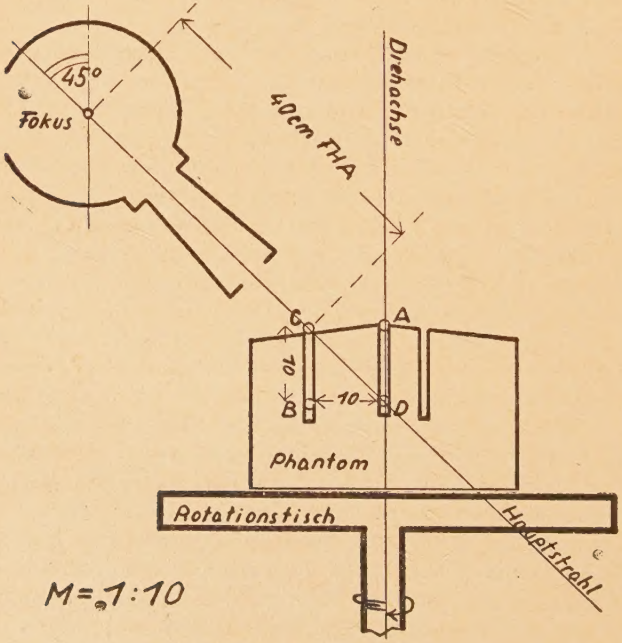


Abb. 2

In Abb. 2 sehen wir noch einmal die Versuchsanlage schematisch im Maßstab 1 : 10 dargestellt. Im Phantom erkennt man die Zentralbohrung, sowie die Bohrungen im 5 cm und 10 cm Abstand. Die übrigen sind vor bzw. hinter der Bildebene zu denken.

In den Hauptpunkten

liegen die Kugelkondensatoren bei dem ersten Versuch. Es versteht sich von selbst, daß, wegen der nicht zu vermeidenden kleinen Entladungsdifferenzen der Kondensatoren alle Versuche mit vertauschten Kammern mindestens zweimal wiederholt wurden, um eine größtmögliche Genauigkeit der Messungen zu gewährleisten.

Versuch 1. 300 r (Tubusdosimeter), feststehender Tisch (7′30″)

C = 120 r	A = 5 r
B = 0 r	D = 20 r

300 r (Tubusdosimeter), rotierender Tisch (7′30″)

C = 10 r	A = 5 r
B = 0 r	D = 20 r

Bei diesem äußerst eindrucksvollen Versuch sehen wir, wie sich die Oberflächendosis im Einfallsfeld von 120 r auf 10 r, also praktisch auf ein Minimum reduziert, während die Tiefendosis im Punkte D, der Tumormitte, erhalten bleibt. Die Oberflächendosis im Drehpunkt behält ihren Wert von 5 r, da sie ja ihre Lagebeziehung zum Strahlenbündel während der Rotation nicht ändert. Die Tiefendosis im Punkte B, also in 10 cm Tiefe und 10 cm Entfernung vom Schnittpunkt der Drehachse mit dem Hauptstrahl, ist so gering, daß sie praktisch nicht mehr zu messen ist.

Schon diese Meßergebnisse in den Hauptpunkten zeigen in äußerst eindrucksvoller Form die ungleich größeren Vorteile der Schrägrotationsbestrahlung gegenüber den anderen Methoden der Tiefentherapie. Vor ihrer Verwendung in der Praxis jedoch ist eine genaue Durchlotung des bestrahlten Raumes und damit eine genaue Erforschung der Tiefendosen unerläßlich. Durch die Resultate in den Hauptpunkten des ersten Versuchs darf man nicht versucht sein anzunehmen, daß es sich im Punkt D, also im Schnittpunkt des Hauptstrahls mit der Drehachse, um die tatsächliche maximale Tiefendosis handelte, in die der Tumor einzustellen wäre. Wie anders sich die wirklichen Ergebnisse durch die Komponenten der Streuung und Absorption gestalten, werden die nächsten Versuche zeigen.

Die nun folgenden Messungen wurden unter verschiedenen Winkeln durchgeführt, um auf diesem direkten Weg das tatsächliche, günstigste Verhältnis von Oberflächendosis : Herddosis zu ermitteln. Die Bestrahlung erfolgte unter 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50° und 55° von der Drehachse gemessen. In der Arbeit wiedergegeben wurden aus Gründen der besseren Anschaulichkeit nur die Winkel zwischen 30° und 50°. Die übrigen Resultate sind für un-

Versuch 2.

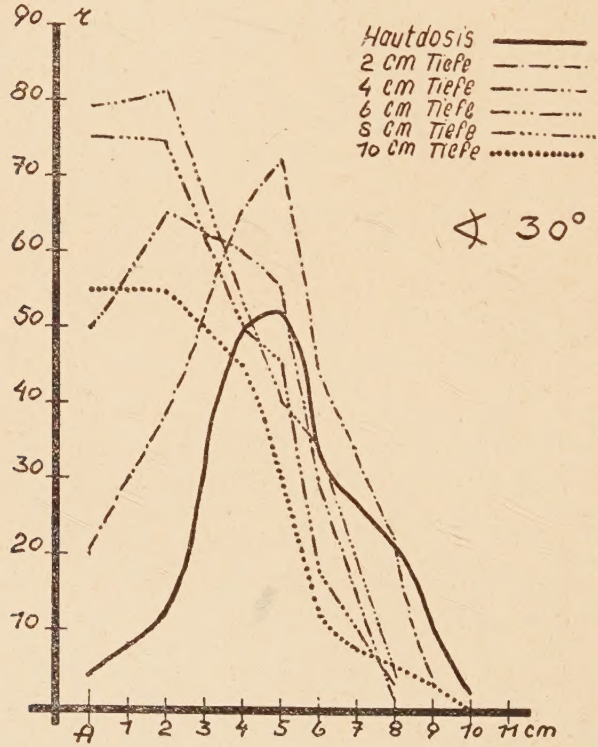


Abb. 3

zeigt die Ergebnisse bei 30°, 600 r (Tubusdosimeter), 180 kV, 8mA, 0,5 Cu, 40 cm FHA und 4×5 cm Tubus. Der Mittelpunkt des Einfallsfeldes beschreibt einen Kreis von 11,5 cm ø.

sere Zwecke und das allgemeine Verständnis unwesentlich. Nun blieb noch die günstigste Art der Darstellung für die gemessenen Tiefendosen zu wählen. Die beste Darstellung für die drei Fak-

toren: Tiefe, Abstand von der Drehachse und gemessene r-Zahl wäre das räumliche Koordinatensystem. Aus ersichtlichen Gründen jedoch wurden die ermittelten Werte 2-dimensional graphisch dargestellt. In den Abbildungen 3—6 gibt die Ordinate die Höhe der Dosis an, die Abszisse den Abstand vom Drehpunkt und das Kurvenmuster die jeweilige Schichttiefe. Bei jedem Winkel wurde schichtweise alle 2 cm von der Oberfläche bis zur 10 cm Tiefe und zur Kontrolle anschließend jede Bohrung einzeln ausgemessen, d. h. es befanden sich innerhalb einer Bohrung sämtliche Kondensatoren von der Oberfläche bis zur 10 cm-Tiefe im 2 cm Abstand untereinander. Eine Messung unter diesem Gesichtspunkt sehen wir bei einem Winkel von 45° in der Abb. 7.

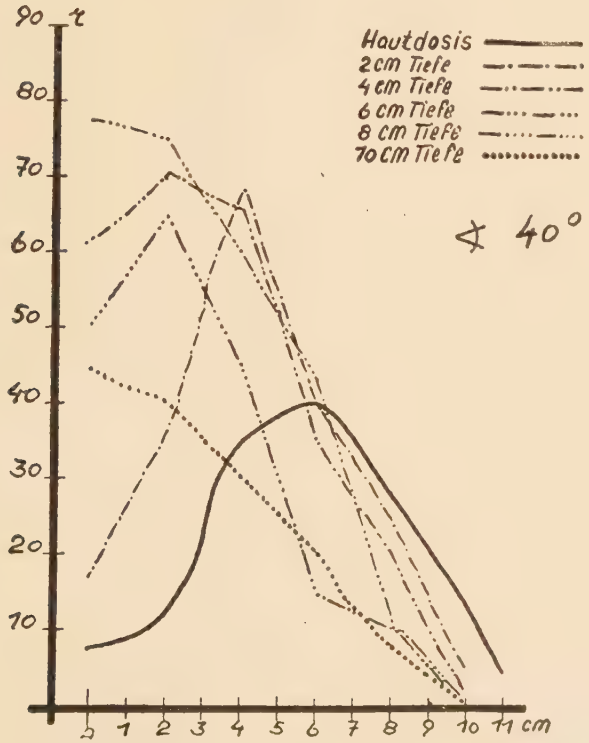


Abb. 4

zeigt die Ergebnisse bei einem Winkel von 40° unter den oben angegebenen Bedingungen. Der Mittelpunkt des Einfallsfeldes beschreibt einen Kreis von 16 cm ø.

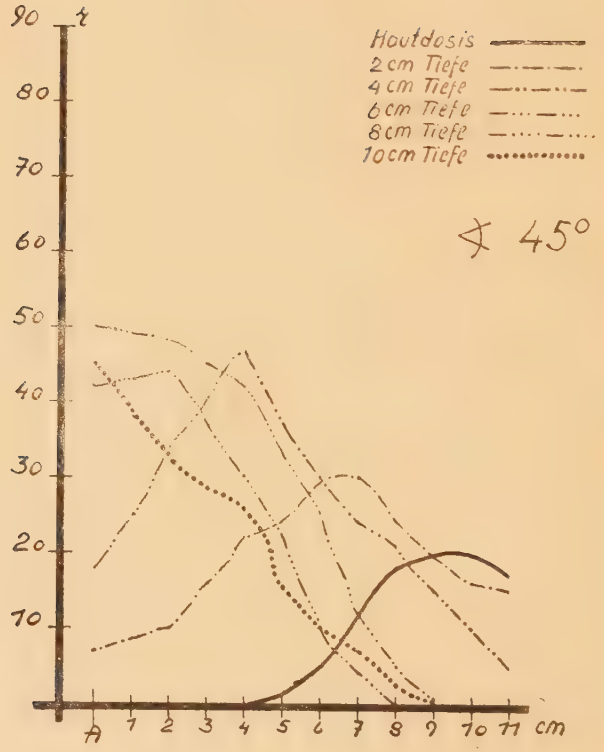


Abb. 5

stellt die Ergebnisse unter gleichen Bestrahlungsbedingungen bei einem Winkel von 45° dar. Der Mittelpunkt des Einfallsfeldes beschreibt einen Kreis von 20 cm ø.

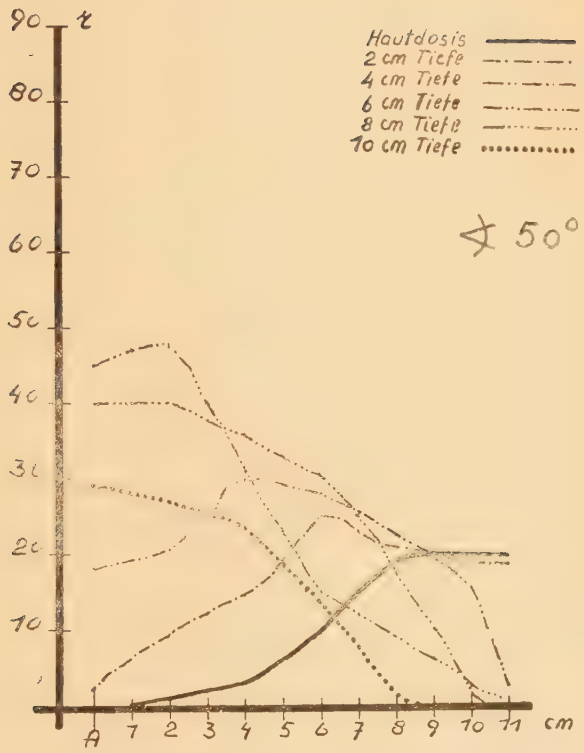


Abb. 6

zeigt die Ergebnisse bei gleichen Bedingungen und einem Winkel von 50°. Der Mittelpunkt des Einfallsfeldes beschreibt einen Kreis von 23.5 cm Ø.

In der **Abb. 7** sehen wir unter den gleichen Bedingungen und ebenfalls bei einem Winkel von 45° dieselben Tiefendosenverhältnisse. Nur stellen hier die Kurvenscharen nicht die Messungen innerhalb einer Tiefenschicht, sondern vielmehr innerhalb der Bohrlöcher in der Drehachse und im Abstand von 2, 4, 6, 8 und 10 cm dar.

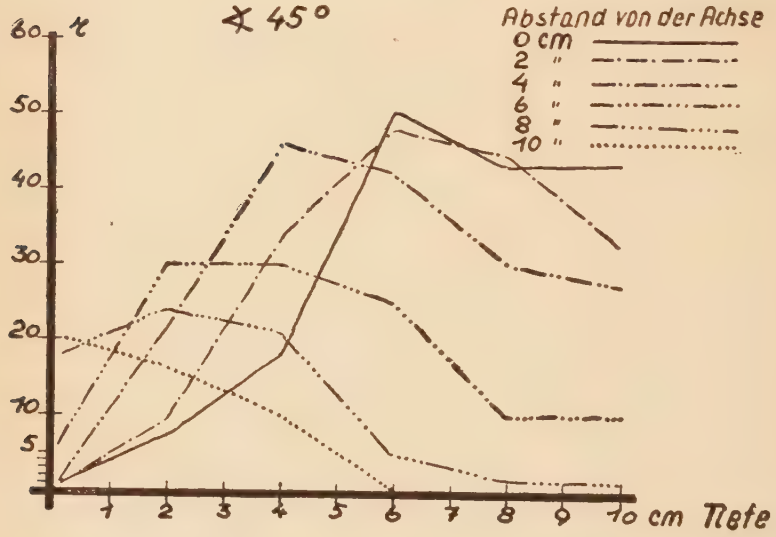


Abb. 7.

Meßergebnisse.

Bei näherer Betrachtung unserer vier Hauptkurven in den Abbildungen 3—6 sehen wir, daß die Kulminationspunkte, also die Höchstdosen für die jeweilige Tiefenschicht, sich im allgemeinen mit zunehmender Winkelgröße von der Drehachse entfernen und außerdem quantitativ verringern. Wir erkennen aber sofort, daß sich die Intensitätswerte aller Kurven nicht im gleichen Verhältnis verkleinern, sondern daß mit abnehmender Schichttiefe sich dieses Verhältnis vergrößert. Bei der Kurve der Oberflächendosis sehen wir bei einem Winkel von 30° den Gipfel zwischen 4 und 6 cm Abstand von der Achse liegen. Das entspricht also der Peripherie eines Kreises von ca. 11 cm Ø, den das Einfallsfeld um den Drehpunkt beschreibt. Gleichzeitig stellt die Kurve mit großer Eindrücklichkeit die gute Abblendung des Strahlenbündels dar, denn sie fällt zum Drehpunkt hin auf ein Minimum von 4 r ab, während sie nach außen bei 10 cm Abstand auf 2 r und bei 11 cm völlig auf Null herunter geht. Bei 40° sehen wir den Gipfel entsprechend nach außen verlagert und die Höchstdosis verringert, ebenfalls ein steiler Abfall auf ein Minimum nach beiden Seiten. Bei 11 cm Abstand ist jedoch bereits eine Dosis von 4 r zu messen. Bei dem Winkel von 45° und 20 cm Ø ist das stark herabgesetzte Dosismaximum zwischen 9 und 10 cm zu finden. Während die Kurve nach außen nur in geringem Maße abfällt, ist zur Drehachse hin bereits bei 4 cm Abstand der Nullpunkt erreicht. Das bedeutet, daß bei diesem Winkel die Oberflächenbelastung der Innenfläche des umschreibenden Kreises völlig entfällt und sich die ganze Intensität der Rotationsbestrahlung in den Tiefenschichten konzentrieren muß. Bei 50° sehen wir im Vergleich zu dem Winkel von 45° wieder ein langsames Ansteigen der Oberflächendosis zur unmittelbaren Nähe der Drehachse hin, während auch nach außen das Dosenmaximum allzulange erhalten bleibt. Der Grund hierfür ist in einem bereits sehr schrägen Einfallen des Röntgenstrahlenbündels zur Oberfläche und der dadurch hervorgerufenen starken Streustrahlung zu suchen.

Vergleichen wir hierzu den Verlauf der Kurve der Tiefendosis in 10 cm Tiefe, so sehen wir, daß die Tendenz dieser Kurve ziemlich gradlinig verläuft und sie das Bestreben hat, ihre Werte zu verringern. Das günstige Verhältnis von Tiefendosis zur Oberflächendosis liegt hier ebenfalls offensichtlich bei einem Winkel von 45°. Die Tatsache, daß die Gipfelpunkte der Oberflächenkurve sich mit zunehmender Winkelgröße über 45° an der theoretischen Strahleneintrittsstelle leicht zur Drehachse verlagern, ist, neben einer Ursache, die später erwähnt wird, der Streustrahlung durch die zunehmende Schrägung des Röntgenstrahlenbündels zuzuschreiben. Betrachten wir die Resultate der Oberflächendosiskurve und der

10 cm-Tiefendosiskurve, besonders das deutliche Bild von der Kreuzung des absteigenden Astes der Oberflächendosis zum ansteigenden der Tiefendosis, so scheinen sich die Ergebnisse der praktischen Messungen durchaus mit den früheren Erwägungen zu decken. Wie verhalten sich nun die Ergebnisse der Schichten von 2—8 cm Tiefe?

Die Kulminationspunkte der Kurven für die einzelnen Tiefenschichten bei 45° wären leicht zu ermitteln. Rechnerisch lägen sie für eine Tiefenschicht von 2 cm bei 8 cm Achsabstand
Tiefenschicht von 4 cm bei 6 cm Achsabstand
Tiefenschicht von 6 cm bei 4 cm Achsabstand
Tiefenschicht von 8 cm bei 2 cm Achsabstand.

Im leeren Raum, wo die Komponenten der Absorption und Streuzusatzstrahlung fortfallen, würden diese Werte auch ihre Richtigkeit behalten. Hier aber, bei der Bestrahlung von, dem Körpergewebe ähnlichem Material verändern sich die Werte erheblich. Betrachten wir nun die Ergebnisse der graphischen Darstellung des Winkels von 45°, bei dem der Aufbau der Kurven am klarsten zu erkennen ist. Die Oberflächendosis erreicht ihr Maximum an der Peripherie des Kreises, den der Mittelpunkt des Einfallsfeldes um die Drehachse beschreibt. Sie fällt dann stetig ab, so daß sie schon in 4 cm Abstand von der Drehachse ihren Nullwert erreicht. Die Kurve der 2 cm Tiefenschicht beginnt naturgemäß mit einem etwas geringeren Wert, da der Meßpunkt im 10 cm Achsabstand noch außerhalb der Mitte des diese Ebene durchstoßenden Strahlenbündels liegt. In diesem eben besprochenen Punkt ist aber noch nicht die Höchstdosis erreicht, sondern die Kurve steigt weiter an bis zu 6—7 cm Achsabstand und fällt dann stetig ab. In der Drehachse ist bei 2 cm Tiefe jedoch schon eine merkbare Dosis zu verzeichnen. Aehnlich verläuft die Dosiskurve der 4 cm Tiefenschicht. Auch sie erreicht ihren Höchstwert erst innerhalb vom Schnittpunkt: Hauptstrahl—Schichtebene, bei 4 cm Achsabstand und fällt dann stetig zur Drehachse ab. Die Kurve der 6 cm Tiefenschicht dagegen beginnt erst bei erst 9 cm Achsabstand und steigt fast gradlinig bis zur Drehachse an. Gleichzeitig erreicht sie die absolute Höchstdosis. Die Kurve der 8 cm Tiefenschicht steigt mit derselben Tendenz in die Höhe, kulminiert aber dann an der theoretisch angegebenen Stelle, im 2 cm Achsabstand, und fällt leicht gegen das Drehzentrum ab. Durch Vergleichen dieser Ergebnisse mit denen der anderen Winkel, sehen wir, daß diese Werte richtig sein müssen, denn die Kurven verändern sich zügig je nach der Größe des Winkels, unter dem die Bestrahlung stattgefunden hat.

Betrachten wir nun in Abbildung 7 die Darstellung der Tiefendosenverhältnisse innerhalb der einzelnen Bohrungen, so sehen wir,

daß nicht etwa die absolute Höchstdosis in 10 cm Tiefe, also im Schnittpunkt von Hauptstrahl und Drehachse liegt, sondern daß vielmehr das Dosenmaximum, zwar naturgemäß auf der Drehachse, aber in der 6 cm Ebene zu finden ist. Der, vom therapeutischen Gesichtspunkt aus für unsere Zwecke mit Höchstdosen wirksam bestrahlte Raum besitzt also eine Kulminationsbreite von der 4—8 cm Tiefenschicht und eine horizontale Ausdehnung bis zum 4 cm-Achsabstand.

Der Grund für dieses eigenartige Verhalten der Tiefendosen ist in folgendem zu suchen. Der durch die Phantomoberfläche eintretende Hauptstrahl beschreibt im Schnittpunkt mit der Drehachse einen Doppelkegel mit einander zugekehrten Spitzen, ebenso die oberen und unteren Begrenzungsstrahlen des Strahlenbündels. Diese nun wieder umschreiben zusammen einen Raum, der einem Doppelkegel mit einander zugekehrten Grundflächen gleicht. Aus Gründen der Intensitätsverringerung mit zunehmender Tiefe, sowie

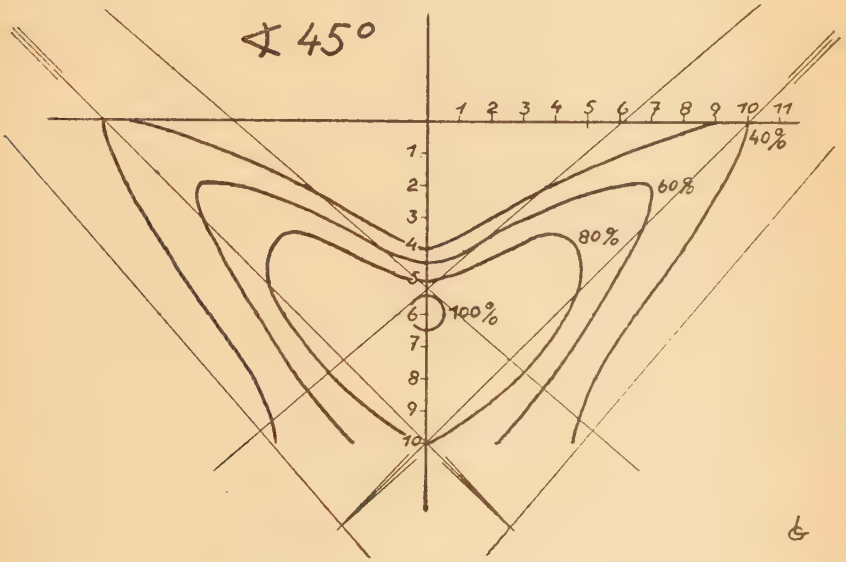


Abb. 8.

durch die Wegverkürzung der oberen, inneren Begrenzungsstrahlen und durch das Ueberschneiden der bestrahlten Räume befindet sich das Dosenmaximum im oberen Teil des Doppelkegels. Eine Vorstellung von der genaueren Form des mit Höchstdosen bestrahlten Herdgebietes erhalten wir durch das Umrechnen der absoluten Dosen (Abb. 3—6) auf Kurven der prozentualen Tiefendosen.

Setzen wir das Dosenmaximum auf der Drehachse in 6 cm Tiefe gleich 100%, so erhalten wir bei 80% Strahlenausbeute eine Schnittlinie, die bei einer gedachten Rotation um die Drehachse einen linsen- bzw. herzförmigen konkav-konvexen Mantel darstellt von 5 cm Tiefe und ca. 8 cm Ø. Im Innern des „Mantels" finden wir eine zunehmende Erhöhung der Dosis bis 100%, während außerhalb die Dosiswerte sich zügig verringern. Vergleichen wir den Verlauf der weiteren prozentualen Tiefendosenkurven, so können wir sagen, daß die Höchstdosen für die einzelnen Schichten sich bereits von der Oberflächeneintrittsstelle ab aus der Strahlenmitte fort, zentral zur Drehachse und gegen die Oberfläche hin verlagern (vergl. Abb. 8).

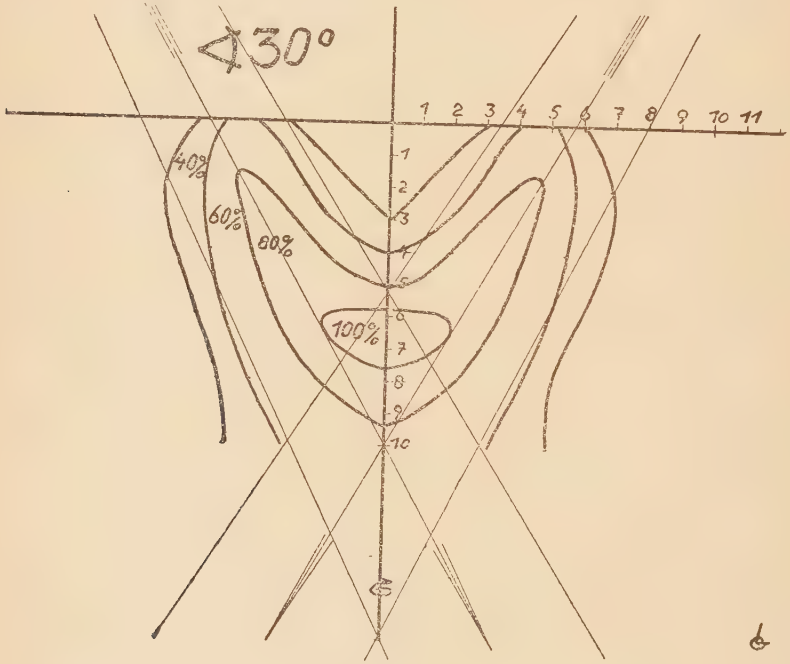


Abb. 9
stellt die Isodosenverhältnisse bei einem Bestrahlungswinkel von 30° dar. Sie sind aufgestellt an Hand der, aus Abb. 3 ersichtlichen, gemessenen Tiefendosen.

Sowohl die Form, als auch die Lage des Herdgebietes als Resultat unserer Messungen weichen merklich von der Darstellung Du Mesnil de Rochemonts (Strahlentherapie 68 (1940) Pag. 234, Bild 10 mit Text) ab. In ihr finden wir das Herdgebiet innerhalb des von den oberen und unteren Begrenzungsstrahlen gebildeten Doppelkegels mit einander zugekehrten Grundflächen.

Jedoch ist auch hier das absolute Dosenmaximum am oberen Pol der Spindel zu finden. Vom therapeutischen Gesichtspunkt aus ist die Form, Lage und Ausdehnung des Gebietes der Höchstdosen für die genaue Einstellung des Tumors von erheblicher Bedeutung.

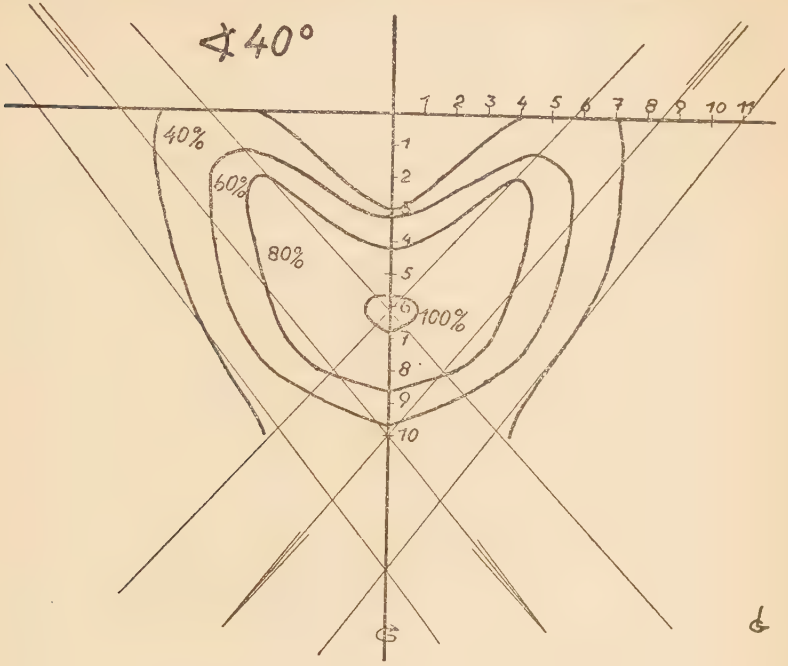


Abb. 10
zeigt die Isodosen bei 40°, vergl. Abb. 4.

Betrachten wir nach der Besprechung des Winkels von 45° das Isodosenverhältnis der einzelnen Bestrahlungswinkel untereinander (vergl. Abb. 8, 9, 10, 11), so sehen wir, daß trotz zunehmender Winkelgröße sich die prozentuale Höchstdosis konstant in der 6 cm-Schicht hält. Erst bei weiterer Vergrößerung des Winkels auf 50° macht sich ein Abgleiten der prozentualen Höchstdosis in Richtung Schnittpunkt: Hauptstrahl—Drehachse auf die 8 cm-Schicht bemerkbar. Das Volumen des mit 100% bestrahlten Raumes jedoch nimmt von 30° auf 40° merklich ab, um dann aber über 45° und 50° etwa gleich zu bleiben. Die Vergrößerung des mit 100% bestrahlten Raumes bei 30° ist auf den, für die Praxis bereits ausgesprochenen spitzen Charakter des Winkels zurückzuführen. Durch die bereits stark in die Länge gezogene Spindelform des bei der Bestrahlung sich überschneidenden Raumes und

die damit verbundene Wegverkürzung des inneren, oberen Begrenzungsstrahls steigert sich die Intensität und addiert sich die Streustrahlung. Auch ist zu beachten, daß bei weiterer Verkleinerung des Winkels auf 0° (Drehachse) sowohl die Höchstdosis in die oberflächlichen Gewebsschichten steigt, als auch die seitliche Ausdehnung des mit 100% bestrahlten Raumes die ganze Breite des senkrecht einfallenden Strahlenbündels einnimmt, und damit das Wesen der Rotation: die Konzentration auf einen kleinstumschriebenen Raum, entfällt.

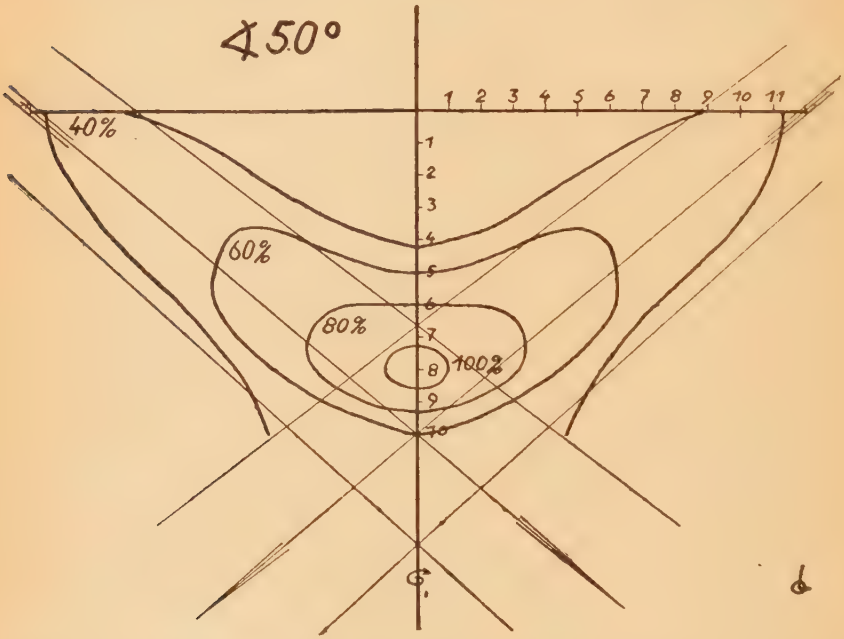
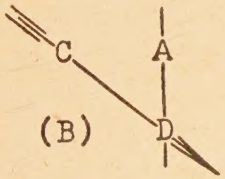


Abb. 11
zeigt die Isodosenverhältnisse bei einem Bestrahlungswinkel von 50°. vgl. Abb. 6.

Von Bedeutung wäre ferner, durch eine günstige Abblendungsform des Strahlenbündels eine möglichst homogene Hautbelastung des bestrahlten Ringes an der Oberfläche zu erreichen. Durch die bei unseren Versuchen angewandte rechteckige Abblendung überschnitten sich die auf die Oberfläche projizierten Strahlenkegelquerschnitte durch die Peripherieverkürzung auf der Innenseite des Ringes. Ein Phänomen, das wir bereits oben an der Verschiebung der Kulminationspunkte zur Drehachse hin gezeigt hatten. Die zweckmäßigste Form der Abblendung wäre also eine Trapezform mit der Basis nach unten. Dadurch, daß die Basis den kürzeren Weg zur Phantomoberfläche besitzt, kommt die längere Seite des Strahlen-

kegelquerschnittes an die äußere und die kürzere Trapezseite an die innere Peripherie des bestrahlten Hautringes. Die Ueberschneidungen sind damit vermieden und eine weitere Homogenisierung der Hautbelastung ist erreicht.

Abschließend darf ich noch erwähnen, daß zur Vervollständigung der Versuche Messungen an Patienten nach dieser Methode vorgenommen wurden. In einem Fall handelte es sich um eine karzinomatöse Stenose der Cardia, im anderen, ebenfalls bei einem Manne, um ein Pyloruskarzinom. Beide Fälle waren durch die Lokalisation der Tumoren für unsere Zwecke geeignet. Die Messungen wurden nach den aus Abb. 2 und den aus dem ersten Versuch hervorgehenden Bestrahlungsbedingungen mit 600 r durchgeführt. Die Patienten schluckten zu diesem Zwecke einen der üblichen Kugelkondensatoren, der aus hygienischen Gründen sich in einer kleinen, verschraubbaren Hornkapsel befand. An einem geeichten Faden war die jeweilige Tiefe der Kammer, von den Zahnreihen aus gerechnet, abzulesen. Sodann wurde der Patient vor den Röntgenschirm gestellt und nun mit kleinen Schlucken Paraff. liquid. die Kammer in die Stenose getrieben. Die Dosis von 4 r, die die Kammer vor dem Röntgenschirm zusätzlich erhielt, wurde ermittelt und abgerechnet. Die im Schirm sichtbare Lokalisation der Kammer wurde auf der Haut in zwei Ebenen fixiert, sodann wurde der Patient auf den Rotationstisch gelegt und die Apparatur in der üblichen Weise eingestellt. Auf der Haut befestigten wir die zweite Kammer in der Drehachse und die dritte im 10 cm-Abstand, also in dem Ring, den das Strahleneinfallsfeld beschreibt. Wir erhielten



jetzt also wieder die Punkte, wobei die Kammer im Punkte B aus ersichtlichen Gründen fortfallen mußte. Das Resultat war in beiden Fällen das gleiche, wie im ersten Versuch bei doppelter Dosis, bzw. wie in Abb. 5 der nächsten Versuche.

Zusammenfassung.

Zusammenfassend ist also darauf zu achten, daß sowohl Lokalisation wie auch Ausdehnung des Tumors möglichst genau bekannt sind. Außerdem ist eine präzise Handhabung der oben erwähnten Einstellvorrichtungen notwendig, wobei in der Hauptsache darauf zu achten ist, daß der Tumor in die obere Region des Doppelkegels lokalisiert wird, das heißt: der Schnittpunkt des Hauptstrahls mit der Drehachse muß sich, im Verhältnis zur Größe des Winkels, in einem gewissen Abstand unterhalb der Tumormitte befinden. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so läßt sich durch die Schrägrotationsbestrahlung mit verhältnismäßig einfachen Mitteln in der Tiefe des Körpers eine sehr hohe Konzentration der Dosis am Tumor unter weitgehender Schonung der gesunden Umgebung erreichen. Die größtmögliche Homogenität der Belastung in der Tumorgegend, sowie die Möglichkeit, die Tiefendosis ohne stärkere Hautreaktion befürchten zu müssen, in einem bisher nicht üblichen Maße zu steigern und die niedrige Belastung außerhalb der Geschwulstgegend, bei der die Gefahr irreversibler Schädigungen gering ist, bieten der Rotationsbestrahlung, insbesondere der Schrägrotationsmethode, große Anwendungsmöglichkeiten in der Röntgentherapie.

Am Schluß meiner Arbeit sei es mir gestattet, Herrn Professor Dr. Karl Frik, sowie Herrn Dr. Heinz Oeser für die Ueberlassung des Themas meinen aufrichtigsten Dank auszusprechen.

Literaturnachweis.

Pohl: Deutsches Reichs-Patent Nr. 296 657, 301 955, 341 357.
Kohl: Deutsches Reichs-Patent Nr. 192 571 (1906).
Wieser: Verh. dtsch. Röntgen-Ges. 10, 177 (1914).
Rahm: Strahlentherapie 16, 451 (1924).
Archangelsky: Fortschr. Röntgenstr. 39, 1129 (1929).
Mayer: Zbl. Radiol. 19, 288 (1935).
Strandqvist: Acta Radiol. 16, 304 (1935).
Maragliano: Strahlentherapie 57, 299 (1936).
Nakaidzumi & Motida: Strahlentherapie 60, 307 (1937).
Dessauer, Lion & Gökmen: Strahlentherapie 60, 546 (1937).
Du Mesnil de Rochemont: Strahlentherapie 60, 648 (1937).
Dessauer & Gökmen: Fortschr. Röntgenstr. 56, 218 (1937).
Dessauer: Verh. 2. internat. Kongreß Kampf Krebs 2, 338 (1937).
Flax: Radiology 28, 477 (1937).
Reiss: Strahlentherapie 61, 384 (1938).
Du Mesnil de Rochemont: Strahlentherapie 63, 176 (1938).
Henschke: Fortschr. Röntgenstr. 58, 456 (1938).
Bozorth & Haworth: Physic. Rev. 53, 538 (1938).
Günsel: Strahlentherapie 56, 639 (1939).
Nakaidzumi & Miyakawa: Strahlentherapie 66, 583 (1938).
Du Mesnil de Rochemont: Strahlentherapie 66, 593 (1939).
Du Mesnil de Rochemont: Fortschr. Röntgenstr. 60, 101 (1939).
Berkman & Tevfik, Hellmann & Dessauer: Radiologia clin. Basel 8, 3 (1939).
Günsel: Strahlentherapie 67, 286 (1940).
Bender & Kohler: Strahlentherapie 67, 669 (1940).
Du Mesnil de Rochemont: Strahlentherapie 68, 221 (1940).
Nakaidzumi & Miyakawa: Strahlentherapie 68, 254 (1940).
Kohler: Zbl. f. Chir. 272 (1940).
Hawley: Radiology 35, 65 (1940).
Du Mesnil de Rochemont: Strahlentherapie 69, 407 (1941).
Nielsen & Jensen: Acta Radiol. 23 Fasc. 1 Nr. 131 (1942).
Spengruber, P.: Dissertation, München (1939).
Höfels, O.: Dissertation, München (1940).
Fritsche, H.: Dissertation, München (1940).

Lebenslauf.

Am 25. Juni 1917 wurde ich, Günter Lengeling, in Berlin als Sohn des Majors Wilhelm Lengeling geboren. Im sechsten Lebensjahr wurde ich in die 14. Gemeindeschule in Berlin-Schöneberg eingeschult. Nach vier Jahren kam ich auf das staatl. Prinz-Heinrichs-Gymnasium, ebenfalls in Berlin-Schöneberg, wo ich, nach neunjähriger Schulzeit, Ende Februar 1936 das Abiturientenexamen bestand. Durch meine freiwillige Meldung zum Wehrdienst wurde ich von April bis September 36 zum Arbeitsdienst eingezogen. Am 15. Oktober 36 kam ich zur Panzertruppe nach Stahnsdorf. Nach eineinhalbjähriger Dienstzeit wurde ich auf Grund der Bestimmungen für Medizinstudenten und Res.-Sanitätsoffiziersanwärter zum Studium entlassen.

Am 1. 4. 38 wurde ich auf der Friedrich-Wilhelms-Universität in Berlin immatrikuliert, an der ich auch im April 1940 die ärztliche Vorprüfung bestand. Wegen des inzwischen ausgebrochenen Krieges erfolgte zur selben Zeit meine U. K.-Stellung bis zum Staatsexamen, wodurch es mir möglich war, auch im Klinikum ohne Unterbrechung zu studieren. Im Mai 41 wurde ich wiederum zur Wehrmacht einberufen und kam zur 1. Studentenkompanie der Heeres-San.-Staffel, Berlin. Nachdem ich in den Semesterferien des vergangenen Jahres von August bis Oktober bei der Infanterie am Rußlandfeldzug teilgenommen hatte, habe ich nun das 10. und letzte Semester an der hiesigen Universität belegt und mich im Frühjahr 1942 zum Staatsexamen gemeldet.